

*На правах рукописи*

**БУЗОРИНА Дарья Сергеевна**

**ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ ФОРМИРОВАНИЯ ШВА И РАЗРАБОТКА  
МЕТОДИКИ РАСЧЕТА РЕЖИМОВ ДУГОВОЙ СВАРКИ В ЗАЩИТНЫХ  
ГАЗАХ**

05.02.10 – Сварка, родственные процессы и технологии

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Екатеринбург – 2014

Работа выполнена в ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
**Шалимов Михаил Петрович**

Официальные оппоненты: **Гладков Эдуард Александрович**,  
доктор технических наук, профессор  
Федеральное государственное бюджетное образова-  
тельное учреждение высшего профессионального об-  
разования «Московский государственный техниче-  
ский университет имени Н.Э. Баумана»,  
профессор кафедры «Технология сварки и диагно-  
стики»

**Гончаров Семен Николаевич**,  
кандидат технических наук  
ОАО «Уральский завод транспортного машиностро-  
ения», главный сварщик

Ведущая организация: **Федеральное государственное бюджетное образо-  
вательное учреждение высшего профессиональ-  
ного образования «Пермский национальный ис-  
следовательский политехнический университет»**

Защита диссертации состоится 05.02.2015 г. в 14:00 ч. на заседании диссер-  
тационного совета Д 212.285.10 на базе ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный  
университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина» по адресу: 620002, г.  
Екатеринбург, ул. Мира, 19, зал заседаний Ученого совета университета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВПО  
«Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ель-  
цина», <http://dissovet.science.urfu.ru/news2/>

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2014 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор технических наук

Раскатов Е. Ю.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Многопроходная дуговая сварка плавящимся электродом благодаря своей универсальности и относительной простоте механизации и автоматизации процесса является одним из широко применяемых способов сварки при производстве сварных конструкций, в том числе из проката толщиной более 10 мм. Несмотря на широкую распространенность способа, при реализации технологии многопроходной сварки плавящимся электродом зачастую сталкиваются с проблемой обеспечения требуемого качества сварных соединений, а именно с возникновением дефектов. Для получения сварных швов с требуемыми механическими свойствами, благоприятной структурой и минимальными остаточными напряжениями тепловложение в свариваемый металл не должно превышать допускаемого. Но при недостаточном тепловложении в процессе многопроходной сварки толстолистового проката вследствие повышенного теплоотвода в основной металл возрастает вероятность образования несплавлений между валиком и кромками разделки, а также между соседними валиками. Известно, что качество формирования сварного соединения зависит как от геометрических характеристик разделки, положения электрода в разделке, техники сварки, так и от параметров режима процесса. Получение заданной глубины проплавления при удовлетворительном формировании сварного шва возможно за счет варьирования в допустимых пределах параметров режима сварки (ток, напряжение, скорость сварки), определяющих тепловложение.

Для разработки технологии многопроходной сварки необходимо наличие методик, позволяющих рассчитывать параметры режима, обеспечивающие заданную глубину проплавления при минимально необходимом тепловложении в изделие. Известные методики определения режима ограничены рамками отдельных типов сварных соединений из низкоуглеродистых сталей, часто применимы только для однопроводных швов, не в полной мере отражают ряд особенностей многопроходной сварки, таких как угол разделки, положение электрода в ней, вид прохода (корневой, горячий, заполняющий, облицовочный) и т.д. Кроме того, во многих суще-

ствующих методиках в расчетах рекомендуется использовать значение эффективного КПД ( $\eta_{\text{и}}$ ), величина которого зависит от многих технологических параметров, известные диапазоны значений эффективного КПД для каждого вида сварки достаточно широкие. В настоящей работе для оценки эффективности процесса сварки применяется полный тепловой КПД процесса сварки, характеризующий долю тепловой мощности дуги, идущую на расплавление металла сварного шва.

Таким образом, изучение условий формирования шва и особенностей распределения теплоты при многопроходной сварке, а также разработка методики расчета режима сварки, учитывающей влияние геометрических и технологических параметров на формирование сварного соединения остаются актуальными. Критерием качественного формирования сварного шва может быть принята максимальная эффективность процесса сварки при условии получения требуемой площади сечения сварного валика и заданного коэффициента площадей, характеризующего соотношение площадей проплавленного и наплавленного металлов.

**Цель работы** – создание методики расчета режимов дуговой сварки в защитных газах, обеспечивающих получение качественных сварных соединений, на основе теоретических и экспериментальных исследований условий формирования шва и распределения теплоты.

Работа направлена на решение задачи повышения качества сварных соединений при сварке плавящимся электродом листового металлопроката толщиной от 10 до 50 мм из углеродистой низколегированной стали в смеси защитных газов на основе аргона с добавлением углекислого газа от 0 до 30%.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Исследование влияния угла разделки, положения электрода в разделке, скорости сварки, состава защитного газа и вылета электрода на геометрические размеры сварного шва.
2. Определение полного теплового КПД процесса сварки в смеси защитных газов.
3. Получение аналитических зависимостей геометрических размеров свар-

ного шва и теплового КПД процесса от параметров режима сварки, от формы сечения разделки, от вылета электрода и от состава смеси защитных газов.

4. Разработка методики расчета режимов дуговой сварки в защитных газах при заданных показателях качества сварного шва.

5. Экспериментальное подтверждение разработанной методики.

**Методы исследований.** Для достижения поставленной цели были использованы теоретические, экспериментальные и вычислительные методы исследований.

Для проведения экспериментов была скомпонована установка, в состав которой входят: стол с токоподводом; механизм перемещения горелки Noboruder NB-5H; сварочный аппарат S5 Pulse (ШТОРМ-LORCH). Параметры режима сварки фиксировали с помощью встроенных в аппарат приборов измерения.

Площадь сечения сварного валика определяли измерением макрошлифов сваренных образцов с помощью программы «Компас-3DV12».

Статистическая обработка экспериментальных данных проводилась с помощью программы STATISTICA 6.1 и Microsoft Excel.

**Степень достоверности полученных результатов** подтверждается применением современных методов исследования, требуемой повторяемостью опытов, большим объемом экспериментального материала с использованием статистической обработки результатов. Положения и выводы по работе не противоречат известным научным представлениям и результатам.

#### **Научная новизна:**

1) показано, что одним из основных факторов, для которого впервые установлена количественная зависимость и который оказывает существенное влияние на качественное формирование сварного шва, является определенное сочетание геометрии разделки и параметров режима сварки;

2) определены зависимости полного теплового КПД процесса сварки и площади сечения валика от технологических параметров для обеспечения формирования сварного шва в соответствии с требованиями нормативной документации;

3) установлена зависимость электрических параметров режима сварки от

угла разделки, скорости сварки, положения электрода в разделке при механизированной сварке в защитных газах, в том числе при наложении пристеночного валика;

4) установлена зависимость между величиной сварочного тока и глубиной проплавления при сварке с поперечными колебаниями электрода применительно к многопроходной сварке низкоуглеродистых сталей плавящимся электродом в защитных газах.

#### **Практическая значимость работы:**

1) на основании полученных автором зависимостей разработана методика расчета режимов многопроходной дуговой сварки в защитных газах для получения сварных соединений с заданным коэффициентом площадей, разработан алгоритм и программа расчета режима сварки;

2) на основе экспериментальных данных сформулированы граничные условия технологических параметров сварки для получения качественного формирования сварного соединения с заданным коэффициентом площадей;

3) установлена зависимость и получено уравнение управления сварочным током в процессе сварки с поперечными колебаниями электрода для обеспечения заданного проплавления. Реализована программа управления сварочным током при сварке с поперечными колебаниями для обеспечения заданного проплавления.

**Апробация работы.** Основные результаты работы доложены и обсуждены на научно-технических конференциях «Сварка и диагностика» в рамках XII Международной специализированной выставки «Сварка. Контроль и диагностика» (Екатеринбург, 2012 г.), «Сварка и диагностика» в рамках XIII Международной специализированной выставки «Сварка. Контроль и диагностика» (Екатеринбург, 2013 г.), научно-технической конференции, посвященной 125-летию изобретения Н.Г.Славяновым электродуговой сварки плавящимся электродом (Пермь, 2013 г.), Сварка и родственные технологии – настоящее и будущее (Киев, 2013 г.).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 13 работ, в том числе 5 работ в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав,

выводов по работе, заключения, списка литературы и 5 приложений. Материал изложен на 139 листах машинописного текста, содержит 48 рисунков, 21 таблицу. Список литературы содержит 119 наименований.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

В **первой главе** на основе анализа литературных данных приведены технологические особенности и характерные дефекты при многопроходной сварке. Наиболее типичными дефектами являются несплавления между отдельными валиками и со стенками разделки, вызванные неблагоприятной формой предыдущего валика или наличием подрезов кромок основного металла. Согласно многим исследованиям, снизить вероятность появления несплавлений можно за счет точного позиционирования электрода, оптимизации формирования и раскладки валиков. Однако, также известно, что качество формирования сварного соединения зависит как от геометрических характеристик разделки, техники сварки, так и от параметров режима сварки, характеризующих тепловложение, а также положение электрода (дуги) относительно прослойки расплавленного металла. Согласно литературным данным величина жидкой прослойки влияет на теплоотвод в основной металл, а, следовательно, определяет глубину проплавления. Получение заданной глубины проплавления при качественном формировании шва возможно за счет варьирования параметров режима сварки в допустимых пределах. Критерием качественного формирования сварного шва в настоящей работе принято получение сварного шва с требуемой площадью сечения и с заданным коэффициентом площадей, характеризующим соотношение наплавленного и проплавленного металлов, при максимальной эффективности процесса сварки. Среди существующих показателей эффективности использования тепловой энергии дуги на образование сварного соединения наиболее универсальным является полный тепловой КПД процесса сварки, характеризующий долю тепловой мощности дуги, идущую на расплавление металла сварного шва.

При проектировании технологии многопроходной сварки необходимо нали-

чие методик, позволяющих рассчитывать параметры режима, обеспечивающие заданную глубину проплавления при минимально необходимом тепловложении в изделие. Существенный вклад в разработку методик и зависимостей для расчета параметров режима сварки внесли В.П. Демянцевич, В.Е. Кривошея, А.М. Попков, И.Ф. Коринец, С.В. Дубовецкий, Г.И. Сергацкий, О.Г. Касаткин, В.А. Судник, С.И. Коробейников и А.С. Бабкин, Г.А. Бельчук и Н.Я. Титов и многие другие. Алгоритмы прямых и обратных задач включают экспериментально-статистические зависимости между геометрическими характеристиками сварного шва и параметрами режима сварки. Однако, известные на сегодняшний день методики определения режима сварки ограничены рамками отдельных типов сварных соединений из низкоуглеродистых сталей, часто применимы только для однократных соединений, не в полной мере отражают ряд особенностей многопроходной сварки, таких как угол разделки, положение электрода в ней, вид прохода (корневой, горячий, заполняющий, облицовочный) и т.д. Таким образом, к настоящему времени нет методик расчета режимов многопроходной сварки, учитывающих ее особенности и технологические параметры, оказывающие влияние на формирование сварного соединения.

На основании вышесказанного можно сделать вывод, что изучение особенностей распределения теплоты при многопроходной сварке, а также получение на этой основе уравнений для расчета параметров режима сварки для обеспечения качества сварных соединений, учитывающих влияние геометрических и технологических параметров на формирование сварного соединения, является актуальной задачей.

Проведенный обзор литературных данных позволил сформулировать цель и определить основные задачи исследований.

**Вторая глава** посвящена исследованию влияния технологических параметров на показатели качества сварного соединения. В соответствии с принятым в настоящей работе определением качественного формирования сварного шва выходными параметрами заданы площадь сечения валика и полный тепловой КПД процесса сварки. В качестве факторов, оказывающих влияние на формирование



сварочного валика, на основе анализа литературных данных выбраны угол скоса кромок ( $\alpha$ ), положение электрода – расстояние от оси электродной проволоки до стенки разделки ( $x$ ), скорость сварки ( $v_{св}$ ), состав защитного газа ( $\% CO_2$ ) и вылет электрода ( $l_э$ ).

На основании анализа влияния технологических параметров на формирование сварного шва и физической модели процесса сварки плавящимся электродом в разделку зависимости площади сечения валика и полного теплового КПД процесса сварки от скорости сварки, угла разделки и положения электрода в разделке  $F_v(a, x, v_{св})$ ,  $h_v(a, x, v_{св})$  могут быть с достаточной точностью аппроксимированы уравнением регрессии следующего вида:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i \chi_i + \sum_{i,j=1}^k b_{ij} \chi_i \chi_j + \sum_{i,j,u=1}^k b_{iju} \chi_i \chi_j \chi_u, \quad (1)$$

где  $y$  – функция отклика,

$b_i, b_{ij}, b_{iju}$  – экспериментально определяемые коэффициенты при соответствующих переменных,

$\chi_i, \chi_j, \chi_u$  – переменные факторы.

Данные уравнения учитывают влияние каждого исследуемого фактора по отдельности, а также их совместное влияние, следовательно, отражают совместное взаимное влияние параметров режима сварки и величины жидкой прослойки под дугой. Однако, для обеспечения адекватности данных уравнений при изменении условий сварки, учитывая принятые допущения 1, 2, необходимо ввести поправочные коэффициенты от сварочного тока, состава защитного газа и вылета электрода. Коэффициенты могут быть экспериментально определены и записаны в виде функций одного аргумента:

$$q_l^F(I_{св}), q_{\%}^F(\% CO_2), q_l^F(l_э) = e^{x_i^n + b_0}. \quad (2)$$

Учитывая вышесказанное, уравнения для определения площади сечения валика и полного теплового КПД процесса сварки можно представить в следующем виде:

$$F = F_v(a, x, v_{св}) q_l^F(I_{св}) q_{\%}^F(\% CO_2) q_l^F(l_э), \quad (3)$$

$$h_c = h_v(a, x, v_{св}) \Psi_I^h(I_{св}) \Psi_{\%}^h(\% CO_2) \Psi_{l_3}^h(l_3)$$

, (4)

где  $F_v(a, x, v_{св})$ ,  $\eta_v(a, x, v_{св})$  – функции зависимости площади сечения валика и полного теплового КПД соответственно от угла скоса кромок,  $\alpha$ , положения электрода в разделке,  $x$ , скорости сварки  $v_{св}$ ;

$q_I^F(I_{св})$ ;  $q_{\%}^F(\% CO_2)$ ;  $q_{l_3}^F(l_3)$  – функции зависимости площади сечения валика от сварочного тока,  $I_{св}$ , состава защитного газа (процентного содержания углекислого газа,  $\% CO_2$ , в смеси  $Ar+CO_2$ ) и вылета электрода,  $l_3$  соответственно;

$q_I^h(I_{св})$ ;  $q_{\%}^h(\% CO_2)$ ;  $q_{l_3}^h(l_3)$  – функции зависимости полного теплового КПД процесса сварки от сварочного тока,  $I_{св}$ , состава защитного газа (процентного содержания углекислого газа,  $\% CO_2$ , в смеси  $Ar+CO_2$ ) и вылета электрода,  $l_3$  соответственно.

После обработки результатов всех экспериментов общие уравнения зависимости теплового КПД процесса сварки и площади сечения валика получены в следующем виде:

$$F = (47,50 - 0,031 \cdot a + 4,205 \cdot x - 0,956 \cdot v_{св} - 0,113 \cdot a \cdot x + 0,003 \cdot a \cdot v_{св} - 0,143 \cdot x \cdot v_{св} + 0,004 \cdot a \cdot x \cdot v_{св}) \Psi(0,013 \Psi_{св} - 1,56) \Psi(0,004 \Psi_3 + 0,89) \Psi(0,003 \Psi_{\% CO_2} + 0,92) \quad (5)$$

$$h_c = (0,125 - 0,006 \cdot a + 0,018 \cdot x + 0,024 \cdot v_{св} + 0,00006 \cdot a^2 + 0,0006 \cdot x^2 - 0,0005 \cdot v_{св}^2 - 0,0005 \cdot a \cdot x + 0,00012 \cdot a \cdot v_{св} - 0,00013 \cdot x \cdot v_{св}) \Psi(0,005 \Psi_{св} + 0,08) \Psi(0,002 \Psi_3 + 0,95) \Gamma(0,006 \Psi_{\% CO_2} + 0,83) \quad (6)$$

где  $\alpha$  – угол скоса кромки, град;

$x$  – положение электрода в разделке, мм;

$v_{св}$  – скорость сварки, м/час;

$I_{св}$  – сварочный ток, А;

$l_3$  – вылет электрода, мм;

$\% CO_2$  – процентного содержания углекислого газа в смеси  $Ar+CO_2$ .

**Третья глава** посвящена разработке рекомендаций по расчету параметров

режима дуговой сварки в газах.

Опытная проверка полученных в Главе 2 зависимостей показала удовлетворительную сходимость теоретических и экспериментальных значений площади сечения и теплового КПД процесса сварки (рисунки 1–2). Прямая линия показывает полное совпадение расчетных и экспериментальных значений, каждая точка показывает соответствие значения, рассчитанного по уравнениям (5), (6) экспериментально полученным данным. Следовательно, предложенные регрессионные уравнения могут быть применены при разработке технологии многопроходной сварки в защитных газах.

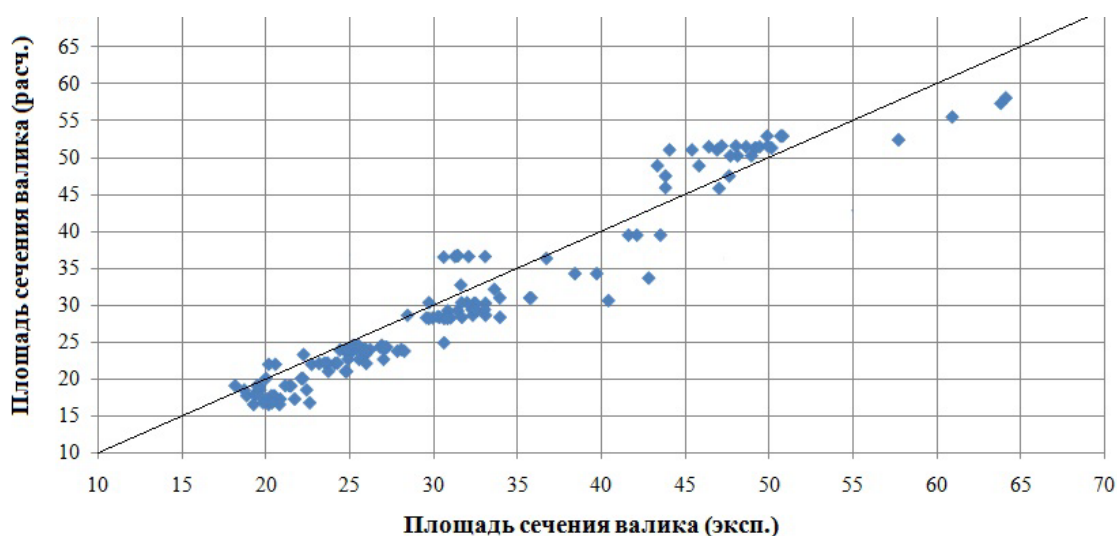


Рисунок 1 – Сравнение экспериментальных и расчетных значений площади сечения валика

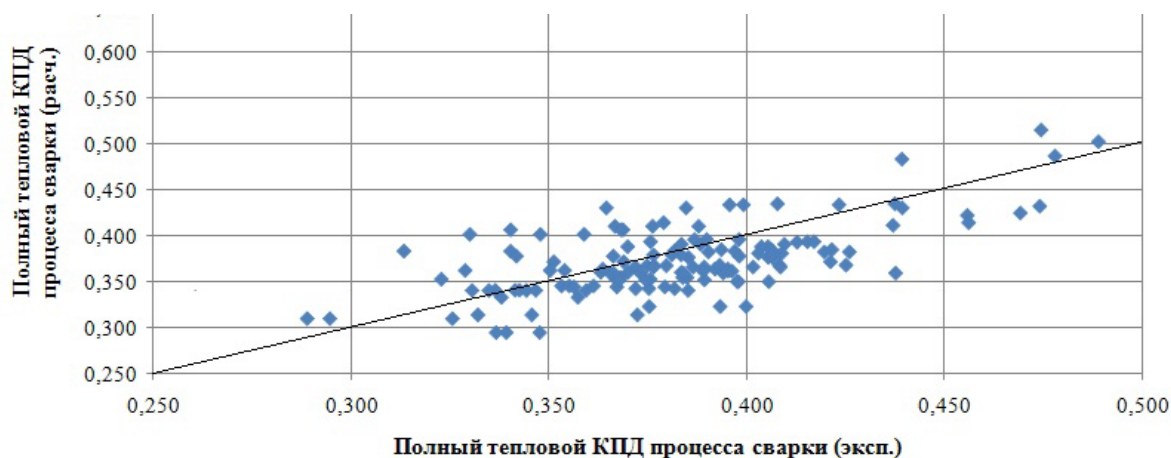


Рисунок 2 – Сравнение экспериментальных и расчетных значений полного теплового КПД процесса сварки

Одним из вариантов заполнения разделки при многопроходной сварке является раскладка валиков в разделке с учетом условий их формирования. Данный подход основан на поддержании постоянных условий сварки и минимизации отклонений от этих условий. Каждый слой выполняется либо как корневой, либо как угловой. Необходимо, чтобы каждый слой в целом получался максимально плоским, насколько это возможно в конкретных условиях.

Режим сварки корневого прохода и геометрия разделки должны обеспечивать необходимую форму корневого валика и проплавление притупления без прожога. К настоящему времени разработано достаточное количество рекомендаций и алгоритмов расчета и оптимизации режима сварки корневого прохода.

В настоящей работе основное внимание уделяется определению параметров режима сварки пристеночных валиков, поскольку именно при наложении пристеночных валиков чаще всего возникают несплавления.

*Исходные данные:* площадь наплавленного металла,  $F_n$ , мм<sup>2</sup>; угол скоса кромки,  $\alpha$ , град.; коэффициент площадей,  $k$ ; положение электрода,  $x$  (рисунок 3), состав защитного газа, %  $CO_2$ ; вылет электрода,  $l_3$ , мм.

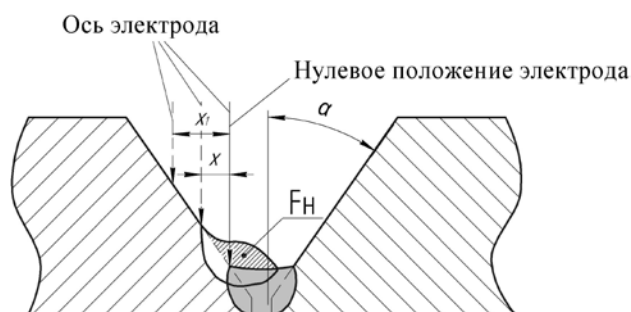


Рисунок 3 – Исходные геометрические размеры для расчета параметров режима сварки

Площадь наплавленного металла,  $F_n$ , может быть рассчитана по номинальным размерам конструктивных элементов подготовленных кромок свариваемых деталей и шва сварного соединения по ГОСТ 14771-76.

Коэффициент площадей  $k$  при сварке плавящимся электродом для применяемых на практике режимах может изменяться от 0,18 до 4,0. Задается  $k$  из условий обеспечения гарантированного проплавления свариваемых кромок (в соответствии

с конструкторской и нормативной документацией).

*Необходимо определить:* диаметр электрода,  $d_э$ , мм; сварочный ток,  $I_{св}$ , А; скорость подачи проволоки,  $v_{пп}$ , м/мин; напряжение,  $U_д$ , В; скорость сварки  $v_{св}$ , м/ч.

Порядок определения режима сварки при заданных исходных данных:

1. **Диаметр электрода** выбирается в зависимости от типа соединения и толщины свариваемого металла (или катета шва).

2. **Сварочный ток:**

$$I_{св} = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ca}}{2a}, \text{ А.} \quad (7)$$

Коэффициенты  $a$ ,  $b$ ,  $c$  определяются по формулам:

$$a = -0,015 \frac{d_э^2}{F_H}.$$

$$b = 0,64 + 0,06 d_э + \frac{\pi d_э^2}{F_H} (3,34 + 0,35 d_э - 0,01 a).$$

$$c = -74,05 + 0,05 d_э - 6,56 d_э - \frac{\pi d_э^2}{F_H} (185,97 - 0,6 d_э d_э - 0,58 d_э + 27,81 d_э) - \frac{(1+k) d_э F_H}{(0,004 d_э + 0,89) (0,003 \% CO_2 + 0,92)}$$

где  $d_э$  – диаметр электрода, мм;

$\alpha$  – угол скоса кромок, град;

$F_H$  – площадь наплавленного металла, мм<sup>2</sup>;

$k$  – коэффициент площадей (при сварке плавящимся электродом при применяемых на практике режимах  $k=0,18 - 4,0$ ).

3. **Скорость подачи проволоки:**

$$v_{пп} = 0,078 I_{св} - 8,32, \text{ м/мин,} \quad (8)$$

где  $I_{св}$  – сварочный ток, А.

#### 4. Скорость сварки:

$$v_{\text{св}} = \frac{\rho d_3^2 (0,078 I_{\text{св}} - 8,32) \eta_0}{4 F_{\text{н}}}, \text{ м/час.} \quad (9)$$

где  $d_3$  – диаметр электрода, мм;

$I_{\text{св}}$  – сварочный ток, А;

$F_{\text{н}}$  – площадь наплавленного металла, мм<sup>2</sup>.

#### 5. Напряжение:

$$U_{\text{эф}} = \frac{B_{\text{эф}} \eta_{\text{пп}}}{h_{\text{с}} \eta_{\text{св}}}, \text{ В,} \quad (10)$$

Значение коэффициента  $B_{\text{эф}}$  определяется по формуле:

$$B_{\text{эф}} = \gamma_{\text{м}} \eta_{\text{нпл}} \frac{(1+k)}{4} \rho \eta^2, \quad (11)$$

где  $\gamma_{\text{м}}$  – удельная плотность металла, кг/м<sup>3</sup>;

$\eta_{\text{нпл}}$  – энтальпия при температуре плавления с учетом скрытой теплоты плавления, Дж/кг;

$k$  – коэффициент площадей;

$d_3$  – диаметр электрода, мм;

Значение теплового КПД процесса сварки по формуле (6).

Полученные параметры режима сварки должны удовлетворять граничным условиям. В общем виде граничные условия параметров сварки для получения качественного формирования шва могут быть записаны в следующем виде:

$$\begin{aligned} & U_{\text{св}}, U_{\text{д}} \text{ Области оптимальных параметров, } 0,03 I_{\text{св}} + 14,07 \text{ J } U_{\text{д}} \text{ J } 0,09 I_{\text{св}} + 13,73 \\ & U_{\text{д}} \text{ ® } U_{\text{эф}} \\ & q_{\text{пог}} \text{ J } q_{\text{пог}}^{\text{доп}} \text{ (ограничение погонной энергии)} \\ & v_{\text{св}}^{\text{факт.}} \text{ i } v_{\text{св}}^{\text{задан.}} \text{ (верхняя граница скорости сварки, исходя из ограничения} \\ & \text{ погонной энергии)} \\ & v_{\text{св}} \text{ ® } \min \text{ (нижняя граница скорости сварки, исходя из условия уменьшения} \\ & \text{ количества проходов, следовательно уменьшения времени сварки)} \end{aligned}$$

На основании предложенной методики разработан алгоритм расчета параметров режима сварки. Алгоритм реализован в виде программы, позволяющей при введении исходных данных (положение электрода в разделке, угол скоса кромок, площадь наплавленного металла, коэффициент площадей, состав защитного газа, вылет электрода) получать значения параметров режима сварки (сварочный ток, скорость сварки, напряжение, скорость подачи электродной проволоки). Интерфейс программы представлен на рисунке 4.



\*- выбирается в зависимости от типа соединения и толщины свариваемого металла (или катета шва)

Рисунок 4 – Интерфейс программы расчета параметров режима сварки

**Четвертая глава** посвящена практическому применению результатов работы при реализации алгоритма управления параметрами режима сварки в роботизированной установке.

В соответствии с методикой расчета (раздел 3) рассчитали параметры режима сварки, обеспечивающие минимальную площадь наплавленного металла при заданном коэффициенте площадей.

Тавровое соединение рассматривается как стыковое соединение с разделкой кромок (эскиз сварного соединения и расчетная схема приведена на рисунке 5).

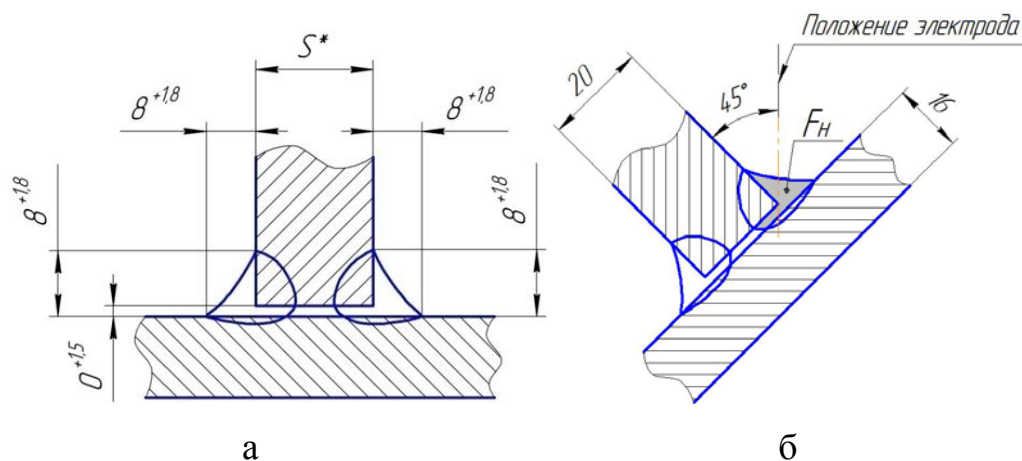


Рисунок 5 – Эскиз сварного шва № 2 (а) и расчетная схема(б)

Тавровое соединение рассматривается как стыковое соединение с разделкой кромок. Согласно конструкторской документации (рисунок 5) угол скоса кромки составляет  $45^\circ$ . Площадь наплавленного металла рассчитаем, исходя из номинальных размеров шва сварного соединения, по формуле:

$$F_H = 0,5 \cdot k^2 + 1,05 \cdot k, \text{ мм}^2. \quad (12)$$

В данном случае получим  $F_H=40,4 \text{ мм}^2$ .

Коэффициент площадей зададим из условия обеспечения гарантированного проплавления кромок –  $k=0,3$ .

По предложенной методике рассчитаем параметры режима сварки, обеспечивающие минимальную площадь наплавленного металла при заданном коэффициенте площадей.

С целью повышения производительности, уменьшения количества дефектов (исправляемых и неисправляемых), а также для обеспечения постоянства сварочных параметров для осуществления сварки была внедрена роботизированная установка (рисунок 6), в алгоритм управления параметрами режима сварки которой были заложены результаты расчета параметров режима сварки по предложенной методике.

В состав роботизированной установки для сварки муфт под основания опоры нефтегазовых труб (ГОСТ 23118-99) входит робот осевой *FANUC mod. ArcMate 100 lc/6L-30A-B-PL*, интегрированный в единую систему с источником питания S8



ШТОРМ-*LORCH*, двумя позиционерами *Positioner 2 Axes* и станцией очистки горелки *ROBOBRS-CC*.



Рисунок 6 – Внешний вид роботизированной установки для сварки муфт

Специальное программное обеспечение позволяет программировать различные виды поперечных колебаний (по синусоиде, треугольное, ромбовидное) для обеспечения оптимального формирования и требуемых размеров шва.

Особенностью алгоритма управления параметрами режима сварки является то, что при сварке с поперечными колебаниями электрода при каждом сочетании параметров разделки, диаметре электрода и т.д. рекомендуется определенный режим сварки для получения одинакового проплавления по всей ширине разделки.

Значение сварочного тока рассчитывали для нулевого положения и для крайних положений электрода в разделке. Амплитуда и частота колебаний выбирались в процессе отработки технологии из условий получения требуемого катета шва: амплитуда колебаний – 2,5 мм, частота колебаний – 3Гц. Режимы сварки приведены в таблице 1.

С помощью системы слежения определяется текущее положение электрода в разделке, и в зависимости от положения электрода регулируются параметры ре-

жима сварки в соответствии с полученным в настоящей работе уравнением управления сварочным током.

Таблица 1 – Результаты расчета параметров режима с помощью программы

Параметр	Значение
Исходные данные	
Угол скоса кромок, град.	22,5
Площадь наплавленного металла $F_n$ , мм <sup>2</sup>	40,4
Коэффициент площадей, $k$	0,3
Положение электрода, $x$ , мм	0
Вылет электрода, $l_3$ , мм	20
Содержание $CO_2$ в смеси защитных газов, %	18
Расчетные параметры режима сварки	
Диаметр электрода, $d_3$ , мм	1,2
Сварочный ток, $I_{0CB}$ , А	240
Скорость сварки, $v_{CB}$ , м/ч	17
Скорость подачи проволоки, $v_{пп}$ , м/мин	10,3
Напряжение на дуге, $U_d$ , В	27
Сварочный ток в крайнем положении $x=2$ мм, $I_1$	286

Применение предложенной в настоящей работе методики расчета параметров режимов сварки позволило получить требуемую геометрию сварных швов и значительное снижение дефектов. Согласно заключению ЦЗЛ, отдела главного сварщика, экономического отдела ЗАО «Курганстальмост», внедрение роботизированной установки для сварки муфт обеспечило повышение производительности в 2,1 раза по сравнению с механизированной сваркой, также позволило снизить количество внутренних дефектов выявляемых УЗК на 15%.

### Общие выводы и результаты работы

1. Исследовано влияние угла разделки, положения электрода в разделке, скорости сварки, состава защитного газа и вылета электрода на геометрические размеры сварного шва.

2. Определен полный тепловой КПД процесса сварки в смеси защитных газов. Анализ полученных зависимостей площади сечения валика и полного теплового КПД процесса сварки от скорости сварки показал, что при перемещении электрода по ширине разделки эти зависимости имеют сложный характер: при одних условиях ( $v_{св}$ ,  $\alpha$ ) при перемещении электрода к кромке значения площади сечения валика и КПД возрастают, а при других – убывают. Такая зависимость может быть объяснена взаимным влиянием геометрии разделки и параметров режима сварки, характеризующим положение электрода (дуги) относительно прослойки расплавленного металла.

3. Сформулированы и получены в аналитическом виде общие уравнения зависимости площади сечения валика и теплового КПД процесса сварки от параметров режима сварки, от формы сечения разделки, от вылета электрода и от состава смеси защитных газов. Зависимости помимо известных параметров учитывают взаимное влияние положения электрода относительно жидкой ванны металла и величину прослойки расплавленного металла под электродом, а также влияние вылета электрода и состава защитного газа.

4. Разработана методика расчета параметров режима дуговой многопроходной сварки в защитных газах на основе определения полного теплового КПД процесса сварки, позволяющая рассчитывать режимы сварки при заданном коэффициенте площадей  $k$  (в рассмотренных пределах  $k$  от 0,20 до 1,57),

5. Экспериментальная проверка показала, что разработанная методика расчета параметров режима сварки обеспечивает достаточную для практических целей точность и может применяться при разработке технологии сварки углеродистой низколегированной стали толщиной от 10 до 50 мм в смесях защитных газов на основе аргона ( $Ar + 0\text{--}30\ \% CO_2$ ).

6. Установлено, что при сварке с поперечными колебаниями электрода для обеспечения заданного проплавления по всей ширине разделки необходимо увеличивать сварочный ток при движении электрода от центра к кромке разделки. Установлена зависимость и получено уравнение управления сварочным током в процессе сварки с поперечными колебаниями электрода для обеспечения заданного

проплавления.

7. Применение сварочных роботизированных комплексов и автоматизированных систем в сочетании с разработанной методикой определения параметров режима сварки, а также с возможностью управления сварочным током в процессе сварки в режиме реального времени позволяет добиться хороших экономических результатов. Зависимости и уравнения, полученные в данной работе, могут быть использованы как элементы программного обеспечения при создании адаптивных сварочных систем.

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНО В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:**

#### **Статьи в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК:**

1. Бузорина Д.С. Проблемы внедрения зауженных разделок при сварке корпусных конструкций специальной техники / Т.А. Рахматуллин, М.А. Шолохов, Д.С. Бузорина // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2012. № 4. С. 64-66 (0,25 п.л./0,08 п.л.).

2. Бузорина Д. С. Эффективность эксплуатации инверторных источников питания/ М. А. Шолохов, А. М. Фивейский, Д. С. Бузорина, Е. В. Лунина // Сварка и диагностика. 2012. № 3. С. 53-56 (0,5 п.л./0,13 п.л.).

3. Бузорина Д.С. Влияние технологических параметров на формирование пристеночного валика при многопроходной сварке в защитных газах / Д.С. Бузорина, М.А. Шолохов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2013. № 9. С. 81-86 (0,63 п.л./0,31 п.л.).

4. Бузорина Д.С. Управление сварочным током в зависимости от положения электрода в разделке при сварке с поперечными колебаниями в защитных газах / М.А. Шолохов, Д.С. Бузорина // Сварка и диагностика. 2014. № 1. С. 19-22 (0,5 п.л./0,25 п.л.).

5. Бузорина Д.С. Расчет параметров режима многопроходной механизированной сварки в защитных газах для получения качественных сварных соединений

/ Д.С. Бузорина // Сварка и диагностика. 2014. № 3. С. 13-17. (0,63 п.л./0,63 п.л.).

#### **Другие публикации:**

1. Бузорина Д.С. Расчет параметров режима наплавки пристеночного валика при многопроходной сварке в защитных газах / М.А. Шолохов, Д.С. Бузорина // Автоматическая сварка. 2013. № 7. С. 63-67 (0,54 п.л./0,27 п.л.).

2. Buzorina D.S. Calculation of mode parameters of wall bead deposition in down-hand multi-pass gas-shielded welding / M.A. Sholokhov, D.S. Buzorina // The Paton welding journal. 2013. № 7. P.61-65 (0,54 п.л./0,27 п.л.).

3. Бузорина Д.С. Расчет эффективности применения инверторных источников питания / А.М. Фивейский, М.А. Шолохов, Д.С. Бузорина // Сб. статей научно-технической конференции в рамках 11 Международной специализированной выставки Сварка. Контроль и диагностика. Екатеринбург, 2011. С. 133 – 144 (0,62 п.л./0,21 п.л.).

4. Бузорина Д.С. К вопросу определения эффективного КПД процесса нагрева при сварке / М.А. Шолохов, А.М. Фивейский, Д.С. Бузорина // СВАРКА И ДИАГНОСТИКА: сборник докладов научно-технической конференции. Екатеринбург, 2012. С. 175-181 (0,27 п.л./0,09 п.л.).

5. Бузорина Д.С. Изучение зависимости формирования пристеночного валика от технологических параметров многопроходной сварки в защитных газах / Д.С. Бузорина, М.А. Шолохов // Сварка и контроль – 2013: материалы международной научно-технической конференции, посвященной 125-летию изобретения Н.Г.Славяновым электродуговой сварки плавящимся электродом (г. Пермь, 15-17 мая 2013). Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2013. С. 41-48 (0,64 п.л./0,32 п.л.).

6. Бузорина Д.С. Определение параметров режима многопроходной сварки в защитных газах на основе исследований теплового КПД процесса сварки / Д.С. Бузорина, М.П. Шалимов, М.А. Шолохов // Сварка и диагностика: сборник докладов научно-технической конференции. Екатеринбург, 2013. С. 30-39 (0,45 п.л./0,15 п.л.).

7. Бузорина Д.С. Изучение влияния технологических параметров на формирование пристеночного валика при многопроходной сварке в защитных газах / М.А. Шолохов, А.М. Фивейский, Д.С. Бузорина // Сварка и родственные технологии – настоящее и будущее: тезисы стендовых докладов. Институт электросварки им. Е.О.Патона НАН Украины. Киев, 2013. С. 110 (0,08 п.л./0,03 п.л.).

8. Бузорина Д.С. Совершенствование методики расчета параметров режима многопроходной сварки в защитных газах / Д.С. Бузорина, М.А. Шолохов, М.П. Шалимов // Автоматическая сварка. 2014. № 10. С. 28-31 (0,43 п.л./0,14 п.л.).